

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”  
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ

**ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ.**  
**Розділ: ТРАНСФОРМАТОРИ**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**  
до практичних занять з дисципліни  
“Електричні машини” для студентів освітньо-кваліфікаційного  
рівня “бакалавр” напрямку підготовки  
6.050702 “ Електромеханіка ”

*Рекомендовано Вченою Радою факультету  
електроенерготехніки та автоматики НТУУ “КПІ”*

Київ  
НТУУ «КПІ»  
2013

УДК 621.314.21

Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни “Електричні машини”. Розділ “Трансформатори” для студентів освітньо-кваліфікаційного рівня “бакалавр” напряму підготовки 6.050702 “Електромеханіка”/ Уклад.: Ю.М. Васьковський, О.А. Гераскін. – К.: НТУУ “КПІ”, 2013. – 37 с.

*Рекомендовано Вченою Радою факультету  
електроенерготехніки та автоматики НТУУ “КПІ”  
(Протокол №\_\_ від \_\_.\_\_.\_\_\_\_ р.)*

На в ч а л ь н е   в и д а н н я

## **ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ.**

### **Розділ: ТРАНСФОРМАТОРИ**

#### **МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до практичних занять з дисципліни  
“Електричні машини” для студентів освітньо-кваліфікаційного  
рівня “бакалавр” напряму підготовки  
6.050702 “Електромеханіка”

Укладачі:    *Васьковський Юрій Миколайович, д-р техн. наук, проф.*  
                  *Гераскін Олександр Анатолійович, канд. техн. наук.*

Відповідальний  
редактор        *В.Ф. Шинкаренко, д-р техн. наук, проф.*

Рецензент      *М.Я. Островерхов, канд. техн. наук., доц.*

© НТУУ “КПІ”, 2013

© Ю.М. Васьковський, О.А. Гераскін, 2013

## ПЕРЕДМОВА

Ці методичні вказівки містять основні формули, відомості та контрольні завдання, які використовуються при проведенні практичних занять з розділу "Трансформатори" дисципліни "Електричні машини", що вивчається на кафедрі електромеханіки Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Ці методичні вказівки також можуть використовуватися студентами інших електромеханічних та електроенергетичних спеціальностей, які вивчають курс "Електричні машини". Основними завданнями практичних занять з розділу "Трансформатори" є:

- закріплення знань з основ теорії трансформаторів;
- набуття вмінь математично описувати основні закономірності і особливості роботи трансформатора з метою вирішення інженерних завдань;
- набуття навичок використання різних підходів до дослідження електромагнітних і електричних систем.

В методичних вказівках наведено систематизований список основних формул і співвідношення величин з теорії трансформаторів, які можуть бути використані при розв'язанні задач.

Умови запропонованих типових завдань містять кілька варіантів, що полегшує видачу домашніх завдань і проведення контрольних робіт.

При вирішенні завдань передбачено використання як абсолютних, так і відносних величин, що дозволяє закріпити навички по їх взаємному перетворенню. Для полегшення вирішення завдань, що вимагають використання допоміжних табличних даних або нестандартних формул, не розглянутих в загальному курсі, ці відомості наведені в додатку.

З метою контролю знань і самоперевірки після кожного розділу наведені контрольні питання. При використанні методичних вказівок студентами інших спеціальностей підбір завдань проводиться викладачем згідно з вимогами робочої програми курсу.

Деякі завдання забезпечені відповідями, а в разі набору варіантів, відповідь наведено для першого з них.

Корисною літературою, яка допоможе в розв'язанні задач буде [1-8].

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| I. ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ТА ФОРМУЛИ З ТЕОРІЇ ТРАНСФОРМАТОРІВ .....                          | 5  |
| II. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗКІВ ЗАДАЧ .....   | 10 |
| III. КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ .....  | 13 |
| 1 Основні співвідношення трансформаторів .....  | 13 |
| 2 Режими холостого ходу і короткого замикання трансформаторів. Схема<br>заміщення ..... | 15 |
| 3 Робота трансформатора під навантаженням .....   | 18 |
| 4 Паралельна робота трансформаторів .....   | 23 |
| 5 Несиметричні режими роботи трансформаторів .....                                      | 27 |
| 6 Перехідні режими роботи трансформаторів .....   | 29 |
| 7 Спеціальні типи трансформаторів.....  | 31 |
| Відповіді до завдань .....  | 34 |
| Перелік рекомендованої літератури .....   | 35 |
| Додаток .....   | 36 |

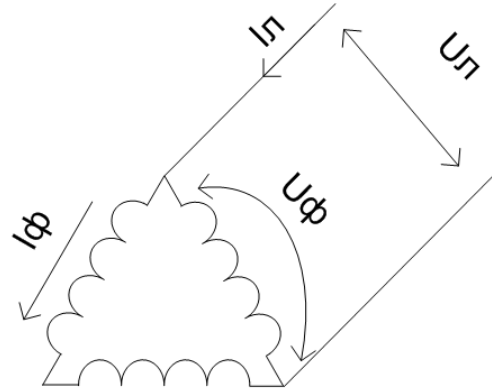
# І. ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ І ФОРМУЛИ З ТЕОРІЇ ТРАНСФОРМАТОРІВ

1. Якщо трансформатор живиться від трифазної мережі живлення, то в залежності від схеми з'єднання між напругами і струмами будуть наступні співвідношення:

а. трикутник:

$$I_{\phi} = \frac{I_{\text{л}}}{\sqrt{3}},$$

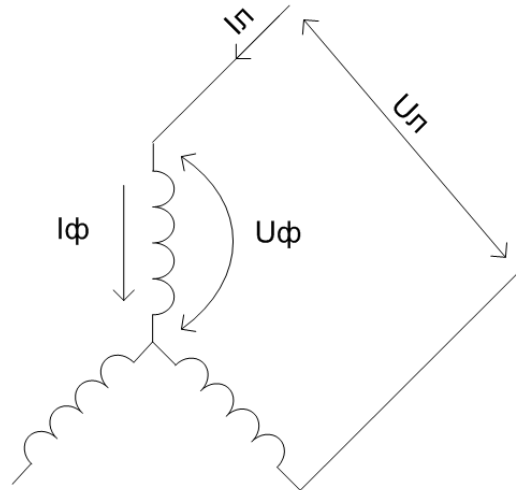
$$U_{\phi} = U_{\text{л}}$$



б. зірка:

$$I_{\phi} = I_{\text{л}},$$

$$U_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}}$$



2. Формули для ЕРС:

а.  $e = -w \frac{d\Phi}{dt}$

б.  $E_1 = 4,44w_1 \cdot f \cdot \Phi_{\text{max}}$  – ЕРС первинної обмотки

с.  $E_2 = 4,44w_2 \cdot f \cdot \Phi_{\text{max}}$  – ЕРС вторинної обмотки

$w_1, w_2$  – числа витків первинної і вторинної обмоток,

$\Phi = \Phi_{\text{max}} \cdot \sin \omega t$  – магнітний потік,  $\omega = 2\pi f$  – кутова частота

3.  $k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}$  – коефіцієнт трансформації

$\frac{U_1}{w_1} = \frac{U_2}{w_2} = \frac{U_{\text{доп}}}{w_{\text{доп}}} = u_{\text{в}}$  – напруга на один виток первинної, вторинної і додаткової обмоток

4. Потужності в трифазному трансформаторі:

$S = 3U_{\phi} \cdot I_{\phi} = \sqrt{3}U_{\text{л}} \cdot I_{\text{л}}$  – повна потужність, [ВА]

$P = 3U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \cos \varphi$  – активна потужність, [Вт]

$Q = 3U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \sin \varphi$  – реактивна потужність, [вар]

5. Потужності в однофазному трансформаторі:

$$S = U_H \cdot I_H - \text{повна потужність, [ВА]}$$

$$P = U_H \cdot I_H \cdot \cos\varphi - \text{активна потужність, [Вт]}$$

$$Q = U_H \cdot I_H \cdot \sin\varphi - \text{реактивна потужність, [вар]}$$

6. Визначення кількості витків в обмотках:

$$w_1 = \frac{U_{1\text{нф}}}{U_{\text{вит}}} - \text{кількість витків первинної обмотки,}$$

$$w_2 = \frac{U_{2\text{нф}}}{U_{\text{вит}}} - \text{кількість витків вторинної обмотки,}$$

де  $U_{\text{вит}}$  – напруга на один виток.

7.  $q = \frac{I_{1\text{нф}}}{J}$  – площа поперечного перетину дроту,

де  $J$  – густина струму,  $[\frac{\text{А}}{\text{мм}^2}]$ .

8.  $Q_{\text{ст}} = \frac{\Phi_{\text{max}}}{k_c \cdot B_{\text{ст}}}$  – площа поперечного перетину стержня магнітопроводу

де  $k_c$  – коефіцієнт заповнення стержня сталлю,

$B_{\text{ст}}$  – магнітна індукція в стержні.

9.  $F = I \cdot w$  – магніторушійна сила (МРС) обмотки

10.  $I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}$  – повний струм,

де  $I_a, I_p$  – активна і реактивна складові струму

11. Приведення вторинної обмотки трансформатора до первинної:

$$U'_2 = U_2 \cdot k$$

$$I'_2 = \frac{I_2}{k}$$

$$r'_2 = r_2 \cdot k^2$$

$$Z'_2 = Z_2 \cdot k^2$$

$$Z'_n = Z_n \cdot k^2$$

де  $k$  – коефіцієнт трансформації

12. Параметри дослідження холостого ходу:

$I_0 = \frac{1}{3}(I_{0A} + I_{0B} + I_{0C})$  – струм холостого ходу для трифазного трансформатора

$U_1 = \frac{1}{3}(U_{0A} + U_{0B} + U_{0C})$  – напруга в холостому ході для трифазного трансформатора

$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{U_1 \cdot I_0}$  – коефіцієнт потужності холостого ходу для однофазного трансформатора

$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{3 \cdot U_1 \cdot I_0}$  – коефіцієнт потужності холостого ходу для трифазного трансформатора

$Z_m = \frac{U_1}{I_0}$  – повний опір ланки намагнічування

$r_m = Z_m \cdot \cos\varphi_0$  – активний опір ланки намагнічування

$x_m = \sqrt{Z_m^2 - r_m^2}$  – індуктивний опір ланки намагнічування

$I_{0\%} = \frac{I_0}{I_{2\text{нф}}} \cdot 100\%$  – струм холостого ходу

$I_{0a\%} = \frac{r_m}{Z_m} \cdot I_{0\%}$  – активна складова струму холостого ходу

$I_{0p\%} = \frac{x_m}{Z_m} \cdot I_{0\%}$  – реактивна складова струму холостого ходу

13. Параметри досліду короткого замикання:

$I_K = \frac{1}{3} (I_{KA} + I_{KB} + I_{KC})$  – струм при короткому замиканні для трифазного трансформатора

$U_K = \frac{1}{3} (U_{KA} + U_{KB} + U_{KC})$  – напруга короткого замикання для трифазного трансформатора

$\cos\varphi_K = \frac{P_K}{U_K \cdot I_K}$  – коефіцієнт потужності короткого замикання для однофазного трансформатора

$\cos\varphi_K = \frac{P_K}{3U_K \cdot I_K}$  – коефіцієнт потужності короткого замикання для трифазного трансформатора

$Z_K = \frac{U_K}{I_K}$  – повний опір короткого замикання

$r_K = Z_K \cdot \cos\varphi_K$  – активний опір короткого замикання

$r_K = r_1 + r'_2$  – активний опір короткого замикання

$r_1 \approx r'_2 = \frac{r_K}{2}$  – активні опори обмоток

$x_1 \approx x'_2 = \frac{x_K}{2}$  – індуктивні опори обмоток

$x_K = \sqrt{Z_K^2 - r_K^2}$  – індуктивний опір короткого замикання

$U_K = \sqrt{U_{Ka}^2 + U_{Kp}^2}$  – напруга короткого замикання

$U_{K\%} = \frac{U_K}{U_{1нф}} \cdot 100\%$  – напруга короткого замикання

$U_{Ka\%} = \frac{r_K}{Z_K} \cdot I_{0\%}$  – активна складова напруги короткого замикання

$U_{Kp\%} = \frac{x_K}{Z_K} \cdot I_{0\%}$  – реактивна складова напруги короткого замикання

14. Визначення ККД трансформатора:

a.  $\eta = \frac{\beta \cdot S_{ном} \cdot \cos\varphi_2}{\beta \cdot S_{ном} \cdot \cos\varphi_2 + P_{0.ном} + \beta^2 \cdot P_{к.ном}}$

b. максимальний ККД при коефіцієнті навантаження  $\beta' = \sqrt{\frac{P_{0.ном}}{P_{к.ном}}}$

$$\eta_{\max} = \frac{\beta' \cdot S_{ном} \cdot \cos\varphi_2}{\beta' \cdot S_{ном} \cdot \cos\varphi_2 + 2 \cdot P_{0.ном}}$$

$\beta' = 0,45 \dots 0,65$ , де  $P_{0.ном}, P_{к.ном}$  – втрати холостого ходу і короткого замикання при, відповідно, номінальній прикладеній напрузі і номінальному струмі.

15. Приведення опорів й інших параметрів до робочої температури обмоток  $+75^\circ\text{C}$ :

$$r_{k75} = r_k [1 + \alpha \cdot (75^\circ - \theta_1)],$$

де  $\alpha = 0,004$  – температурний коефіцієнт, а  $r_k$  – опір обмотки при температурі  $\theta_1$ ;

$$Z_{k75} = \sqrt{r_{k75}^2 + x_k^2}$$

$$\cos\varphi_{k75} = \frac{r_{k75}}{Z_{k75}}$$

$$U_{k75} = \frac{I_{1k} \cdot Z_{k75}}{U_{1H}} \cdot 100$$

16. Зміна величини вторинної напруги трансформатора:

$$\Delta U = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}}$$

$$\Delta U = \beta U_K \cdot \cos(\varphi_K - \varphi_2)$$

$$\Delta U = \beta (U_{Ka} \cdot \cos \varphi_2 + U_{Kp} \cdot \sin \varphi_2)$$

де  $\beta = \frac{I_2}{I_{2ном}}$  – коефіцієнт навантаження

17. Втрати потужності в трансформаторі:

а. електричні втрати:

$$P_{ел} = P_{ел1} + P_{ел2} = mI_1^2 r_1 + mI_2'^2 r_2'$$

$$P_{ел} = \beta^2 \cdot P_{к.ном}$$

б. магнітні втрати:

$$P_M = P_{\Gamma} + P_{в.ст.}$$

де  $P_{\Gamma}$  – втрати на гістерезис,  $P_{в.ст.}$  – втрати на вихрові струми

$$P_M = P_{пит} \left( \frac{B}{B_x} \right)^2 \cdot \left( \frac{f}{50} \right)^{1,3} \cdot G$$

де  $P_{пит}$  – питомі втрати в сталі, [Вт/кг] при індукції  $B_x$ , [Тл],  $G$  – маса магнітопроводу

$$P_{\Gamma} \sim f$$

$$P_{в.ст.} \sim f^2$$

$$P_M \sim f^{1,3}$$

$$P_M \sim B^2$$

18.  $P_{ем} = P_1 - P_{ел1} - P_M$  – електромагнітна потужність

19.  $P_2 = P_1 - \Sigma P$

де  $\Sigma P = P_{ел1} + P_{ел2} + P_M$ ,

$\Sigma P = P_{о.ном} + \beta^2 P_{к.ном}$  – сумарні втрати потужності в трансформаторі

20.  $\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Sigma P}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma P}{P_1}$  – коефіцієнт корисної дії

21.  $S_I^* : S_{II}^* = \frac{1}{U_{KI\%}} : \frac{1}{U_{KII\%}}$  – розподіл навантаження між двома паралельно

працюючими трансформаторами, де  $S_I^*$  і  $S_{II}^*$  – відносні навантаження відповідно першого і другого трансформатора:

$$S_I^* = \frac{S}{U_{KI\%} \cdot \sum_{n=1}^2 \frac{S_{Hn}}{U_{Kn\%}}},$$

$$S_{II}^* = \frac{S}{U_{KII\%} \cdot \sum_{n=1}^2 \frac{S_{Hn}}{U_{Kn\%}}},$$

де  $S$  – сумарна потужність, що віддається обома трансформаторами

$$S = S_{HI} + S_{HII}.$$

Навантаження кожного трансформатора:



$$S_I = \frac{S \cdot S_{HI}}{U_{kI\%} \cdot \sum_{n=1}^2 \frac{S_{Hn}}{U_{kn\%}}},$$

$$S_{II} = \frac{S \cdot S_{HII}}{U_{kII\%} \cdot \sum_{n=1}^2 \frac{S_{Hn}}{U_{kn\%}}},$$

Визначення рівня перевантаженості кожного трансформатора:

$$\Delta S_I = \frac{S_I - S_{HI}}{S_{HI}} \cdot 100 \%$$

## II. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗКІВ ЗАДАЧ [2]

**Приклад 1.** Номінальні значення первинної і вторинної напруги однофазного трансформатора  $U_{1\text{ном}} = 110 \text{ кВ}$ ,  $U_{2\text{ном}} = 6.3 \text{ кВ}$ , номінальний первинний струм  $I_{1\text{ном}} = 95.5 \text{ А}$ . Визначити номінальну потужність трансформатора  $S_{\text{ном}}$  і номінальний вторинний струм  $I_{2\text{ном}}$ .

**Розв'язок:** Номінальна потужність трансформатора

$$S_{\text{ном}} = U_{1\text{ном}} I_{1\text{ном}} = 110 \cdot 95,5 = 10\,500 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Номінальний вторинний струм

$$I_{2\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{U_{2\text{ном}}} = \frac{10\,500}{6,3} = 1667 \text{ А}.$$

**Приклад 2.** В однофазному трансформаторі номінальною потужністю  $S_{\text{ном}} = 100 \text{ кВ} \cdot \text{А}$  і номінальними напругами  $U_{1\text{ном}} = 6000 \text{ В}$  і  $U_{2\text{ном}} = 400 \text{ В}$  при частоті струму  $f = 50 \text{ Гц}$  діюче значення напруги, що припадає на один виток обмоток становить  $U_{\text{вит}} = 5 \text{ В}$ . Густина струму в провідниках обмоток  $J = 4,0 \text{ А/мм}^2$ , максимальне значення магнітної індукції в стержні  $B_{\text{ст}} = 1,4 \text{ Тл}$ , коефіцієнт заповнення шихтованого стержня сталлю  $k_c = 0,93$ . Визначити числа витків обмоток трансформатора  $w_1$  і  $w_2$ , площу поперечного перерізу провідників первинної  $q_1$  і вторинної  $q_2$  обмоток і площу поперечного перерізу стержня магнітопровода  $Q_{\text{ст}}$ .

**Розв'язок:** За номінальними значеннями напруги  $U_{1\text{ном}}$  і  $U_{2\text{ном}}$  визначаємо числа витків в обмотках:

$$w_1 = \frac{U_{1\text{ном}}}{U_{\text{вит}}} = \frac{6000}{5} = 1200;$$

$$w_2 = \frac{U_{2\text{ном}}}{U_{\text{вит}}} = \frac{400}{5} = 80.$$

Номінальні значення струмів в обмотках

$$I_{1\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{U_1} = \frac{100 \cdot 10^3}{6000} = 16.7 \text{ А}$$

$$I_{2\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{U_2} = \frac{100 \cdot 10^3}{400} = 250 \text{ А}$$

Поперечні перерізи обмоточних проводів:

$$q_1 = \frac{I_{1\text{ном}}}{J} = \frac{16,7}{4} = 4,175 \text{ мм}^2;$$

$$q_2 = \frac{I_{2\text{ном}}}{J} = \frac{250}{4} = 62,5 \text{ мм}^2.$$

Визначимо основний магнітний потік в стержні, враховуючи, що номінальна вторинна напруга  $U_{2\text{ном}} = E_2$ :

$$\Phi_{\text{max}} = \frac{E_2}{4,44 \cdot f \cdot w_2} = \frac{400}{4,44 \cdot 50 \cdot 80} = 0,0225 \text{ Вб}.$$

Поперечний переріз стержня магнітопровода

$$Q_{\text{ст}} = \frac{\Phi_{\text{max}}}{k_c \cdot B_{\text{ст}}} = \frac{0,0225}{0,93 \cdot 1,4} = 0,017 \text{ м}^2.$$

**Приклад 3.** Трифазний трансформатор номіальною потужністю  $S_{\text{ном}} = 100 \text{ кВ} \cdot \text{А}$  включений за схемою У/Д. При цьому номіальна лінійна напруга на вході і виході трансформатора відповідно дорівнює:  $U_{1\text{ном}} = 3,0 \text{ кВ}$ ,  $U_{2\text{ном}} = 0,4 \text{ кВ}$ . Визначити співвідношення витків  $w_1/w_2$  і номіальні значення фазних струмів в первинній  $I_{1\phi}$  і вторинній  $I_{2\phi}$  обмотках.

**Розв'язок:** Фазні напруги первинних і вторинних обмоток:

$$U_{1\phi} = \frac{U_{1\text{ном}}}{\sqrt{3}} = \frac{3,0}{\sqrt{3}} = 1,73 \text{ кВ}, \quad U_{2\phi} = U_{2\text{ном}} = 0,4 \text{ кВ}$$

Необхідне співвідношення витків в трансформаторі

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{U_{2\phi}}{U_{1\phi}} = \frac{1,73}{0,4} = 4,32.$$

Номіальний фазний струм в первинній обмотці (сполученою в зірку)

$$I_{1\phi} = I_{1\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3}U_{1\text{ном}}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 3,0} = 19,3 \text{ А}.$$

Номіальний фазний струм у вторинній обмотці (сполученою в трикутник)

$$I_{2\phi} = \frac{I_{2\text{ном}}}{\sqrt{3}} = \frac{S_{\text{ном}}}{3U_{2\text{ном}}} = \frac{100}{3 \cdot 0,4} = 83,3 \text{ А}$$

Таким чином, співвідношення фазних струмів  $\frac{I_{2\phi}}{I_{1\phi}} = \frac{83,3}{19,3} = 4,32$  дорівнює співвідношенню витків в обмотках трансформатора.

**Приклад 4.** Визначити ККД і побудувати графіки залежності  $\eta = f(\beta)$  трифазного трансформатора потужністю  $100 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ , напругою  $6,3/0,22 \text{ кВ}$  за даними дослідів х.х. і к.з.:  $P_{0\text{ном}} = 605 \text{ Вт}$ ,  $P_{\text{к.ном}} = 2160 \text{ Вт}$ . Розрахунок виконати для двох значень коефіцієнта потужності навантаження:  $0,8$  і  $1,0$ .

**Розв'язок:** Для побудови графіків  $\eta = f(\beta)$  обчислюємо ККД для ряду значень коефіцієнта навантаження  $\beta$ , рівних  $0,25$ ;  $0,50$ ;  $0,75$  і  $1,0$ . Результати розрахунку наведені в табл. 1.

Таблиця 1

| $\beta$ | $\beta^2 \cdot P_{\text{к.ном}}, \text{ Вт}$ | $\Sigma P, \text{ Вт}$ | ККД, %, при $\cos\varphi_2$ |                     |
|---------|--|------------------------|-----------------------------|---------------------|
|         |  |                        | $\cos\varphi_2 = 0,8$       | $\cos\varphi_2 = 1$ |
| 0,25    | 134  | 739                    | 96,5                        | 97,0                |
| 0,50    | 540  | 1145                   | 97,3                        | 97,8                |
| 0,75    | 1210   | 1815                   | 97,1                        | 97,6                |
| 1,0     | 2150   | 2755                   | 96,6                        | 97,3                |

Максимальне значення ККД при  $\beta' = \sqrt{\frac{605}{2160}} = 0,53$ :

при  $\cos\varphi_2 = 0,8$ :

$$\eta = \frac{0,53 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 0,8}{0,53 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 0,8 + 2 \cdot 605} = 0,972 \quad \text{або } 97,2\%;$$

при  $\cos\varphi_2 = 1,0$ :

$$\eta = \frac{0,53 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 1,0}{0,53 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 1,0 + 2 \cdot 605} = 0,978 \quad \text{або } 97,8\%.$$

Таким чином, ККД вище при активному навантаженні.

**Приклад 5.** Три трифазні трансформатори з однаковими групами з'єднання включено паралельно на спільне навантаження 5000 кВА. Трансформатори мають наступні дані:  $S_{\text{ном}I} = 1000$  кВА,  $S_{\text{ном}II} = 1800$  кВА,  $S_{\text{ном}III} = 2200$  кВА,  $U_{\text{к}I} = 6,5 \%$ ,  $U_{\text{к}II} = 6,65 \%$ ,  $U_{\text{к}III} = 6,3 \%$ . Визначити навантаження кожного трансформатора.

**Розв'язок:** Визначимо

$$\sum_{n=1}^3 \frac{S_{\text{н}n}}{U_{\text{к}n\%}} = \frac{1000}{6,5} + \frac{1800}{6,65} + \frac{2200}{6,3} = 775$$

Сумарна потужність, що віддається трансформаторами:

$$S = S_{\text{н}I} + S_{\text{н}II} + S_{\text{н}III} = 1000 + 1800 + 2200 = 5000 \text{ кВА}$$

Визначимо навантаження кожного трансформатора:

$$S_I = \frac{S \cdot S_{\text{н}I}}{U_{\text{к}I\%} \cdot \sum_{n=1}^3 \frac{S_{\text{н}n}}{U_{\text{к}n\%}}} = \frac{5000 \cdot 1000}{6,5 \cdot 775} = 995 \text{ кВА}$$

$$S_{II} = \frac{S \cdot S_{\text{н}II}}{U_{\text{к}II\%} \cdot \sum_{n=1}^3 \frac{S_{\text{н}n}}{U_{\text{к}n\%}}} = \frac{5000 \cdot 1800}{6,65 \cdot 775} = 1775 \text{ кВА}$$

$$S_{III} = \frac{S \cdot S_{\text{н}III}}{U_{\text{к}III\%} \cdot \sum_{n=1}^3 \frac{S_{\text{н}n}}{U_{\text{к}n\%}}} = \frac{5000 \cdot 2200}{6,3 \cdot 775} = 2250 \text{ кВА}$$

тобто третій трансформатор виявився перевантаженим на

$$\Delta S_{III} = \frac{S_{III} - S_{\text{н}III}}{S_{\text{н}III}} \cdot 100 \% = \frac{2250 - 2200}{2200} \cdot 100 \% = 2,3 \%$$

Для усунення цього перевантаження слід понизити зовнішнє навантаження трансформаторів на 2,3%, тобто зменшити його до

$$S' = \frac{S \cdot (100 - 2,3)}{100} = \frac{5000 \cdot 97,7}{100} = 4885 \text{ кВА}$$

В цьому випадку сумарна потужність трансформаторів буде використана лише на 97,7%.

### III. КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ

#### 1 Основні співвідношення трансформаторів

1.1. В таблиці 1.1 представлені параметри трансформаторів. Причому, задані лінійні напруги і фазні струми. Визначити відсутні величини.

Таблиця 1.1.

| Величини                 | Варіанти |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------------------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                          | 1        | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
| Потужність $S$ , кВА     | 63       | 100  | 160  | 1000 |      |      | 1000 | 1000 | 1600 | 1600 |
| Напруга $U_1$ , кВ       | 20       | 10   | 10   | 35   | 35   | 35   | 6    | 10   |      |      |
| Напруга $U_2$ , кВ       | 0,4      | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,69 |      |      | 0,4  | 0,69 |
| Струм $I_1$ , А          |          |      |      |      | 4,22 | 10,4 |      |      |      |      |
| Струм $I_2$ , А          |          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Коефіцієнт трансформації |          |      |      |      |      |      | 26   | 43,5 | 25   | 50   |
| Схема з'єднання          | У/Ун     | Д/Ун | У/Ун | Д/Ун | У/Ун | У/Д  | Д/Ун | Д/Ун | У/Ун | Д/Ун |

1.2. Визначити індукцію в стержні трансформатора, якщо відомі наступні дані:

$d_{cm}$  - діаметр описаного навколо стержня кола;

$k_z$  - коефіцієнт заповнення пакета сталлю;

$k_{кр}$  - коефіцієнт заповнення кола;

$u_\phi$  - напруга на виток;

$f$  - частота.

Таблиця 1.2

| Величини      | Варіанти |      |      |      |       |      |      |      |      |      |
|---------------|----------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|
|               | 1        | 2    | 3    | 4    | 5     | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
| $d_{cm}$ , см | 11       | 12,5 | 14   | 14   | 16    | 16   | 18   | 20   | 20   | 22   |
| $k_z$         | 0,93     | 0,93 | 0,95 | 0,94 | 0,93  | 0,95 | 0,95 | 0,94 | 0,94 | 0,95 |
| $k_{кр}$      | 0,913    | 0,92 | 0,92 | 0,92 | 0,913 | 0,92 | 0,92 | 0,92 | 0,92 | 0,92 |
| $u_\phi$ , В  | 2,7      | 3,5  | 4,6  | 4,8  | 6,1   | 6,2  | 7,9  | 9,24 | 8    | 11,2 |
| $f$ , Гц      | 50       | 60   | 50   | 60   | 50    | 60   | 50   | 60   | 50   | 60   |

1.3. Визначити втрати потужності в магнітопроводі  $\Delta p_m$  однофазного трансформатора, що складається з двох стержнів і двох ярів, для різних значень індукції  $B$ , наведених у таблиці 1.3, якщо відомі наступні дані:

$S_m=42$  см<sup>2</sup> – активний переріз магнітопроводу;  $l_{cm}=100$  см – довжина стержня;  $l_\gamma=80$  см – довжина ярма;  $\gamma=7,55 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> – питома маса сталі;  $P_{1,0/50}=0,8$  Вт/кг – питомі втрати.

Таблиця 1.3

| № варіанту | 1   | 2    | 3   | 4    | 5   | 6    | 7    | 8    | 9   | 10  |
|------------|-----|------|-----|------|-----|------|------|------|-----|-----|
| $B$ , Тл   | 1,4 | 1,45 | 1,5 | 1,55 | 1,6 | 1,62 | 1,65 | 1,67 | 1,7 | 1,8 |

1.4. Чому дорівнює площа поперечного перерізу магнітопровода однофазного трансформатора, підключеного до мережі  $U_1=2000$  В з частотою  $f=50$  Гц, якщо коефіцієнт трансформації  $k=50$ , індукція в магнітопроводі  $B=1$  Тл, а число витків вторинної обмотки  $W_2=100$ ?

1.5. Побудувати криву струму намагнічування в залежності від часу для однофазного трансформатора, якщо відомі такі дані:  $U_1 = 220$  В;  $f = 50$  Гц,  $W_1 = 150$  - кількість витків первинної обмотки;  $S_{cm} = 42$  см<sup>2</sup> - площа поперечного перерізу стержня. Марка сталі 3413. Падінням напруги в первинній обмотці і активною складовою струму холостого ходу знехтувати. Стики в магнітопроводі не враховувати.

1.6. Розрахувати струм холостого ходу трифазного трансформатора, якщо відомі розміри трансформатора і наступні технічні дані:

|                                |                                   |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| $S = 1600$ кВА                 | - повна потужність;               |
| $U_1 = 35$ В                   | - первинна напруга;               |
| $U_2 = 0,69$ В                 | - вторинна напруга;               |
| Y/Y – 0                        | - схема з'єднання обмотки;        |
| $P_o = 3650$ Вт                | - втрати холостого ходу;          |
| $S_{cm} = 530$ см <sup>2</sup> | - активний переріз стержня;       |
| $S_{я} = 540$ см <sup>2</sup>  | - активний переріз ярма;          |
| 3413                           | - марка сталі;                    |
| $\delta = 0,003$ см            | - величина стику;                 |
| $l_{cm} = 97,5$ см             | - довжина стержня;                |
| $l_{я} = 52,8$ см              | - довжина ярма;                   |
| $W_1 = 1064$                   | - число витків первинної обмотки. |

1.7. Трифазний трансформатор має наступні номінальні дані:  $S = 63$  кВА;  $U_1 = 5780$  В;  $U_2 = 133$  В;  $I_o = 0,1$  А;  $P_o = 300$  Вт;  $f = 50$  Гц;  $S_{cm} = 80$  см<sup>2</sup> - переріз стержня і ярма. Марка сталі 3413. Індукція в стержні при номінальних даних  $B = 1,5$  Тл.

Визначити, як зміниться споживана трансформатором потужність на холостому ході і струм холостого ходу для випадків:

- напруга, що підводиться, збільшилась на 10%;
- напруга, що підводиться, зменшилась на 10%.

1.8. Обмотка ВН знижувального трансформатора за умовою завдання 1.7 має розгалуження для регулювання напруги на  $\pm 2.5\%$ ;  $\pm 5\%$ . Визначити, як

зміниться струм холостого ходу трансформатора, якщо не змінюючи ні напруги мережі, ні частоти мережі, перейти з середньої ступені розгалуження на верхню і нижню ступені.

1.9. Для трансформатора, дані якого приведені в задачі 1.7, визначити як зміниться струм холостого ходу для випадків:

- а) трансформатор помилково ввімкнули в мережу з частотою  $f = 40$  Гц при номінальній напрузі;
- б) трансформатор помилково ввімкнули в мережу з частотою  $f = 60$  Гц при номінальній напрузі.

### Контрольні питання

1. Чому магнітопроводи силових трансформаторів виробляють феромагнітними?
2. Якими бувають типи магнітопроводів трансформаторів?
3. Чому можлива трьох стержнева конструкція трифазного трансформатора?
4. Чи є симетричною магнітна система трифазного трьох стержневого трансформатора?
5. Чому магнітні системи трансформаторів виконують шихтуванням?
6. Чому переріз стержня трансформаторів виконують ступінчастим?
7. Чому обмотки НН і ВН переважно розташовують концентрично одна в іншій?
8. Які переваги і недоліки трансформатора:
  - а) з мідними обмотками?
  - б) з алюмінієвими обмотками?
9. Чому регулювальні відгалуження розташовують на обмотці ВН?
10. Чому магнітопровід з обмотками поміщають в масляний бак?

## **2 Режими холостого ходу і короткого замикання трансформаторів. Схема заміщення**

2.1. Визначити значення активної і реактивної складових струму холостого ходу у відсотках трифазного трансформатора, якщо відомі наступні дані:

$$S = 400 \text{ кВА}; U_{1л} = 10 \text{ кВ}; P_o = 1080 \text{ Вт}; I_o = 13,3 \text{ А};$$

Д/УН - схема з'єднання обмоток.

2.2. Визначити значення активної і реактивної складових напруги короткого замикання у відсотках трифазного трансформатора за наступними даними:

$S = 100 \text{ кВА}; U_{1л} = 10 \text{ кВ}; P_K = 1970 \text{ Вт}; U_K = 260 \text{ В};$

$У/У_N$  - схема з'єднання обмоток.

2.3. Визначити фазні значення напруг і струмів трифазного трансформатора, параметри трикутника короткого замикання і коефіцієнт потужності при короткому замиканні за даними, наведеними в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

| №<br>Вар | S    | U <sub>1</sub> | U <sub>2</sub> | Група<br>з'єдн.      | P <sub>o</sub> | P <sub>k</sub> | U <sub>k</sub> | I <sub>o</sub> |
|----------|------|----------------|----------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|          | кВА  | кВ             | кВ             |                      | Вт             | Вт             | %              | %              |
| 1        | 100  | 10             | 0,23           | У/У <sub>N</sub> -0  | 365            | 1970           | 4,5            | 2,6            |
| 2        | 100  | 35             | 0,4            | У/У <sub>N</sub> -0  | 465            | 1970           | 6,5            | 2,6            |
| 3        | 250  | 10             | 0,23           | У/У <sub>N</sub> -0  | 780            | 3700           | 4,5            | 2,3            |
| 4        | 400  | 10             | 0,69           | Д/У <sub>N</sub> -11 | 1080           | 5900           | 4,5            | 2,1            |
| 5        | 630  | 35             | 6,3            | У/Д-11               | 2000           | 7600           | 6,5            | 2,0            |
| 6        | 1000 | 6              | 0,4            | Д/У <sub>N</sub> -11 | 2450           | 12200          | 5,5            | 1,4            |
| 7        | 1000 | 10             | 0,4            | У/У <sub>N</sub> -0  | 2450           | 12200          | 5,5            | 1,4            |
| 8        | 1000 | 35             | 6,3            | У/Д-11               | 2750           | 11600          | 6,5            | 1,5            |
| 9        | 1600 | 10             | 3,15           | У/Д-11               | 3300           | 16500          | 5,5            | 1,3            |
| 10       | 1600 | 20             | 0,4            | У/У <sub>N</sub> -0  | 3650           | 18000          | 6,5            | 1,4            |

2.4. За даними, наведеними у таблиці 2.1, визначити активну, реактивну складові струму холостого ходу і коефіцієнт потужності х.х.

2.5. Визначити приведені значення напруг і струмів вторинної обмотки трифазного трансформатора за даними, наведеними у таблиці 2.1.

2.6. За даними, наведеними у таблиці 2.1, визначити кількість витків обмоток і приведені величини струму і напруги вторинної обмотки трифазного трансформатора, якщо напруга додаткової обмотки, кількість витків якої  $W_{доб.} = 20$ , в досліді холостого ходу складає  $U_{доб.} = 54 \text{ В}$ .

2.7. В досліді холостого ходу трифазного трансформатора, номінальна потужність якого  $S = 63 \text{ кВА}; U_1 = 20 \text{ кВ}$ , первинна обмотка з'єднана «зіркою», були виміряні при номінальній напрузі втрати холостого ходу  $P_o = 290 \text{ Вт}$ , струм холостого ходу  $I_o = 0,1 \text{ А}$ . Визначити параметри холостого ходу трансформатора.

2.8. Для трифазного трансформатора з наступними даними:  $S = 400 \text{ кВА}; U_1 = 10 \text{ кВ}$ , первинна обмотка з'єднана за схемою «зірка» у досліді короткого замикання при номінальному струмі були виміряні втрати короткого замикання  $P_K = 5500 \text{ Вт}$ , напруга  $U_K = 450 \text{ В}$ . Визначити параметри обмоток трансформатора.

2.9. Визначити параметри гілки намагнічування схеми заміщення трифазного трансформатора за даними, наведеними у таблиці 2.2.



Таблиця 2.2

| № Вар | S    | U <sub>1</sub> | U <sub>2</sub> | Група з'єдн. | P <sub>o</sub> | P <sub>k</sub> | U <sub>k</sub> | I <sub>o</sub> |
|-------|------|----------------|----------------|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|       | кВа  | кВ             | кВ             |              | Вт             | Вт             | %              | %              |
| 1     | 63   | 10             | 0,23           | У/УН-0       | 265            | 1280           | 4,5            | 2,8            |
| 2     | 400  | 10             | 0,23           | У/УН-0       | 1080           | 5500           | 4,5            | 2,1            |
| 3     | 630  | 10             | 0,4            | У/УН-0       | 1680           | 7600           | 5,5            | 2,0            |
| 4     | 1000 | 35             | 0,4            | Д/УН-11      | 2750           | 12200          | 6,5            | 1,5            |
| 5     | 1600 | 35             | 10,5           | У/Д-11       | 3650           | 16500          | 6,5            | 1,4            |
| 6     | 2500 | 6              | 0,69           | Д/УН-11      | 4600           | 25000          | 5,5            | 1,0            |
| 7     | 2500 | 20             | 10,5           | У/УН-0       | 5100           | 23500          | 6,5            | 1,1            |
| 8     | 4000 | 10             | 3,15           | У/Д-11       | 6400           | 33500          | 6,5            | 0,9            |
| 9     | 4000 | 35             | 6,3            | У/Д-11       | 6700           | 33500          | 7,5            | 1,0            |
| 10    | 6300 | 35             | 3,15           | У/УН-0       | 9400           | 46500          | 7,5            | 0,9            |

2.10. Визначити параметри обмоток трифазного трансформатора за даними, наведеними у таблиці 2.2.

2.11. За каталожними даними, наведеними у таблиці 2.2, визначити параметри схеми заміщення трифазного трансформатора.

2.12. Побудувати схему заміщення трифазного трансформатора і визначити її параметри, якщо відомі наступні дані:  $S = 63$  кВА;  $U_1 = 10$  кВ;  $U_2 = 0,23$  кВ; група з'єднання: У/УН-0;  $U_K = 4,5\%$ ;  $P_O = 280$  Вт;  $I_o = 2,8\%$ ;  $P_{ел1} = 750$  Вт;  $P_{ел2} = 500$  Вт (при температурі 75 °С);  $W_1 = 2174$ ;  $W_2 = 50$ .

### Контрольні питання

1. Який струм споживає з мережі трансформатор на холостому ході?
2. Що являє собою залежність  $U_o = f(I_o)$  при холостому ході трансформатора?
3. Чи зміниться показання амперметра, включеного в первинну обмотку трансформатора, що працює вхолосту, якщо підняти ярмо над стрижнем на 1 см?
4. На що витрачається потужність, споживана трансформатором на холостому ході?
5. Як зміниться коефіцієнт потужності холостого ходу трансформатора при зміні напруги, що підводиться?
6. Як змінюється опір  $X_o$  холостого ходу трансформатора при збільшенні напруги, що підводиться?
7. Яку форму кривої струму намагнічування має однофазний трансформатор і чому?

8. Які переваги і недоліки має трансформатор зі з'єднанням обмоток за схемою Y/Y?
9. Які переваги і недоліки має трансформатор зі з'єднанням обмоток за схемою Y/Д?
10. Чи відбувається спотворення кривих фазних е.р.с. і напруг в трансформаторі зі з'єднанням обмоток за схемою Y/Д і чому?
11. Чи відбувається спотворення кривих фазних е.р.с. і напруг в трансформаторі зі з'єднанням обмоток за схемою Y / Y і чому?
12. На що витрачається потужність, споживана трансформатором при короткому замиканні?
13. Як змінюється повний опір короткого замикання при збільшенні напруги, що підводиться?
14. Чим зумовлена неповнота електромагнітного зв'язку обмотки трансформатора?
15. Що враховує активний опір  $r_\mu$  контуру намагнічування схеми заміщення?
16. Що враховує індуктивний опір  $X_\mu$  контуру намагнічування схеми заміщення?
17. Яким чином можна визначити експериментально параметри контуру намагнічування схеми заміщення і чому?
18. Чому дорівнює індуктивний опір  $Z_\mu$  у відносних одиницях?
19. Яким чином можна визначити експериментально активний і індуктивний опір розсіювання обмоток схеми заміщення трансформатора і чому?
20. Чому дорівнюють індуктивні опори розсіювання обмоток трансформатора у відносних одиницях?

### 3. Робота трансформатора під навантаженням

3.1. Визначити величину струму і коефіцієнт потужності трансформаторів зі сторони високої напруги, якщо навантаження  $Z'_{нав.} = 1$ ,  $Z'_{баз.} = 1$  і  $\cos\phi_2 = 0,9$  (індуктивний). Вихідні дані наведені в таблиці 3.1. Втратами в сталі трансформаторів знехтувати.

Таблиця 3.1.

| Величини                | Варіанти |         |        |         |        |         |
|-------------------------|----------|---------|--------|---------|--------|---------|
|                         | 1        | 2       | 3      | 4       | 5      | 6       |
| $S$ , кВА               | 160      | 400     | 630    | 1600    | 4000   | 6300    |
| $U_1/U_2$ , кВ          | 6/0,4    | 10/0,69 | 10/0,4 | 35/3,15 | 35/6,3 | 35/10,5 |
| Схема з'єднання обмоток | У/УН-0   | Д/УН-11 | У/УН-0 | У/Д-11  | У/Д-11 | У/Д-11  |
| $x_M$ , в.о.            | 40       | 45      | 50     | 65      | 100    | 110     |
| $U_k$ , в.о.            | 0,045    | 0,045   | 0,055  | 0,065   | 0,075  | 0,075   |
| $R_k$ , в.о.            | 0,018    | 0,015   | 0,013  | 0,011   | 0,009  | 0,008   |

3.2. Використовуючи дані таблиці 3.1, визначити струм і коефіцієнт потужності навантаження, якщо первинний струм дорівнює 0,75 номінального, а  $\cos\phi_1 = 0,9$  (індуктивний).

3.3. В таблиці 3.2 наведені дані трифазних трансформаторів. Визначити величину споживаної потужності і коефіцієнт потужності, якщо опір навантаження  $Z'_{\text{нав}}$  дорівнює  $1,2 \cdot Z_{\text{ном}}$  (базисного).

Таблиця 3.2.

| Величини                | Варіанти |        |         |        |         |        |
|-------------------------|----------|--------|---------|--------|---------|--------|
|                         | 1        | 2      | 3       | 4      | 5       | 6      |
| $S$ , кВА               | 40       | 100    | 400     | 1000   | 1600    | 2500   |
| $U_1$ , кВ              | 10       | 10     | 35      | 35     | 20      | 35     |
| Схема з'єднання обмоток | У/УН-0   | У/УН-0 | Д/УН-11 | У/УН-0 | Д/УН-11 | У/Д-11 |
| $I_o$ , %               | 3        | 2,6    | 2,1     | 1,5    | 1,4     | 1,1    |
| $r_M$ , %               | 480      | 490    | 685     | 1040   | 985     | 1434   |
| $U_k$ , %               | 4,5      | 4,5    | 5,0     | 5,5    | 6,0     | 6,5    |
| $r_k$ , %               | 2,05     | 1,97   | 1,47    | 1,2    | 1,12    | 1,0    |
| $\cos\phi_2$            | 0,8      | 0,8    | 0,85    | 0,85   | 0,85    | 0,8    |

3.4. Визначити у відсотках зміну вторинної напруги трансформатора від холостого ходу до номінального навантаження для двох випадків:

- а)  $\cos\phi_2 = 0,8$  (індуктивний);
- б)  $\cos\phi_2 = -0,8$  (ємнісний).

Вихідні дані взяти з таблиці 3.2.

3.5. Виконати вимоги задачі 3.4, використовуючи дані таблиці 3.3.

Таблиця 3.3.

| Величини                | Варіанти |         |         |        |        |        |
|-------------------------|----------|---------|---------|--------|--------|--------|
|                         | 1        | 2       | 3       | 4      | 5      | 6      |
| $S$ , кВА               | 100      | 400     | 630     | 1000   | 6300   | 16000  |
| $U_1$ , кВ              | 6        | 35      | 10      | 10     | 35     | 38,5   |
| Схема з'єднання обмоток | У/УН-0   | Д/УН-11 | Д/УН-11 | У/Д-11 | У/Д-11 | У/Д-11 |
| $U_k$ , %               | 4,5      | 5,5     | 5,5     | 6,5    | 7,5    | 8,0    |
| $\cos\phi_k$            | 0,438    | 0,228   | 0,245   | 0,221  | 0,1    | 0,07   |
| $I_o$ , %               | 2,6      | 2,1     | 2,0     | 1,4    | 0,9    | 0,6    |
| $\cos\phi_o$            | 0,127    | 0,143   | 0,104   | 0,15   | 0,14   | 0,18   |

3.6. Знайти величини струму, коефіцієнта потужності і споживаної потужності первинних обмоток трансформаторів, дані яких наведені у таблиці 3.3, якщо величина приведенного опору навантаження  $Z'_{нав.}$  дорівнює  $1,25 \cdot Z'_{баз.}$  при  $\cos\phi_2=0,85$  (індуктивний).

3.7. Побудувати векторні діаграми трансформатора при активно-індуктивному і активно-ємнісному номінальних навантаженнях, якщо коефіцієнт потужності в обох випадках дорівнює 0,8. Визначити з діаграм величини первинних струмів і коефіцієнтів потужності для обох випадків, навести порівняння. При вирішенні задачі використовувати дані таблиці 3.3.

3.8. Визначити завантаження трансформатора при максимальному ККД, використовуючи дані таблиці 3.3.

3.9. Визначити величини максимального ККД і ККД при номінальному навантаженні трансформаторів за даними таблиці 3.3.

3.10. За даними таблиці 3.3, визначити втрати в трансформаторах при номінальному режимі. Вказати їх співвідношення.

3.11. Визначити ККД трансформатора при номінальному навантаженні і величину навантаження при максимальному ККД, використовуючи дані таблиці 3.4, коефіцієнт потужності навантаження прийняти рівним 0,9.

Таблиця 3.4.

| Величини                | Варіанти |         |         |        |        |        |
|-------------------------|----------|---------|---------|--------|--------|--------|
|                         | 1        | 2       | 3       | 4      | 5      | 6      |
| $S$ , кВА               | 63       | 400     | 630     | 1000   | 6300   | 16000  |
| $U_1$ , кВ              | 10       | 10      | 10      | 10     | 35     | 38,5   |
| Схема з'єднання обмоток | У/УН-0   | Д/УН-11 | Д/УН-11 | У/Д-11 | У/Д-11 | У/Д-11 |
| $P_o$ , кВт             | 0,24     | 0,95    | 3,1     | 4,35   | 5,45   | 8,0    |
| $I_o$ , %               | 2,8      | 2,1     | 1,3     | 1,1    | 0,9    | 0,9    |
| $P_k$ , кВт             | 1,28     | 5,9     | 18      | 23,5   | 33,5   | 46,5   |
| $U_k$ , %               | 4,5      | 4,5     | 5,5     | 6,5    | 6,5    | 7,5    |

3.12. За даними таблиці 3.4, визначити максимальне значення ККД трансформатора. Як зміниться величина максимального ККД, якщо прикладена до трансформатора напруга збільшиться на 10%. Коефіцієнт потужності навантаження прийняти рівним 0,85.

3.13. Знайти максимальне ККД, ККД при номінальному і половині номінального навантаженнях трансформаторів, дані яких наведені в таблиці 3.4. Отримані величини ККД порівняти. При розрахунках прийняти  $\cos\phi_2=0,8$ .

3.14. Трифазний трансформатор потужністю 1000 кВА має максимальне ККД 0,98 при коефіцієнті потужності навантаження  $\cos\phi_2=0,9$  і втратах холостого ходу 2350 Вт. Чому дорівнює коефіцієнт навантаження трансформатора при цьому? Які втрати в міді обмоток при номінальному режимі.

3.15. При якому коефіцієнті навантаження трифазний трансформатор потужністю 400 кВА має максимальний ККД, якщо  $U_{1\phi}=6$  кВ,  $r_k=3,7$  Ом,  $r_\mu=1670$  Ом і  $I_o=2,1\%$ ?

3.16. Визначити величину коефіцієнта потужності навантаження трансформатора, вторинна напруга якого при номінальному навантаженні така ж, як і при холостому ході. При вирішенні скористатися даними таблиці 3.4.

3.17. Визначити вплив зміни первинної напруги при  $W_1=const$  на величину максимального ККД трансформаторів, дані яких наведені в таблиці 3.4. Величини зміни напруги  $\Delta U\%$  задані в таблиці 3.5, коефіцієнт потужності навантаження прийняти постійним і рівним 0,95.

Таблиця 3.5.

| Варіант | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   |
|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| %       | +10 | +15 | +20 | -10 | -20 | +10 | +15 | -10 |

3.18. Визначити при номінальному навантаженні втрати трифазного трансформатора потужністю 1600 кВА, що має  $U_{1\phi} = 5,8$  кВ,  $r_k=0,7$  Ом і максимальний ККД при коефіцієнті навантаження 0,43.

3.19. Визначити втрати в однофазному трансформаторі при номінальному режимі, якщо відома номінальна напруга  $U_1=220$  В, струм холостого ходу  $I_o=9$  А, падіння магнітного потенціалу в магнітопроводі 1250 А, кількість витків первинної обмотки  $W_1=150$  і коефіцієнт навантаження при максимальному ККД  $k_H=0,45$ . Падінням навантаження в первинній обмотці знехтувати.

3.20. Трифазний трансформатор має номінальну фазну напругу  $U_1 = 3470$  В, повний опір короткого замикання  $Z_k = 16$  Ом, падіння вторинної напруги при номінальному навантаженні  $\Delta U = 1,5\%$  при коефіцієнті потужності  $\cos\phi_2 = 0,8$  (індуктивний), активна складова напруги короткого замикання  $U_{ka} = 1,5\%$ . Визначити величину номінального струму.

#### Контрольні питання

1. Як проводять за схемою заміщення трансформатора розрахунок струмів в обмотках, коефіцієнт потужності і ККД при його роботі під навантаженням?
2. Як на векторній діаграмі зображені рівняння рівноваги електрорушійних сил і намагнічуючих сил обмоток?
3. Які види втрат потужності мають місце в трансформаторі і де вони локалізовані на схемі заміщення?
4. Як залежать втрати в сталі від зміни прикладеної напруги?
5. При якому співвідношенні втрат трансформатор працює з максимальним ККД?
6. Як визначити навантаження, при якій трансформатор працює з максимальним ККД?
7. Що необхідно зробити, щоб спроектований трансформатор мав максимальні ККД при номінальному навантаженні?
8. Чому з ростом струму навантаження змінюється вторинна напруга трансформатора?
9. Як можна забезпечити постійну вторинну напругу трансформатора з ростом струму навантаження?
10. Які допущення зроблені при переході до спрощеної схеми заміщення? Яка область її застосування?

## 4 Паралельна робота трансформаторів

4.1. Визначити групи з'єднання трансформаторів, схеми обмоток яких наведені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

| Варіант | З'єднання обмоток на стороні високої напруги | З'єднання обмоток на стороні низької напруги |
|---------|--|--|
| 1       |  |  |
| 2       |  |  |
| 3       |  |  |
| 4       |  |  |
| 5       |  |  |
| 6       |  |  |

4.2. Визначити групу з'єднання і вказати можливі схеми з'єднання обмоток трансформатора, якщо експериментально визначено і приведено в таблиці 4.2 напруги між затискачами трансформатора. У досліді затискачі фази «А» високої і низької напруги були електрично з'єднані.

Таблиця 4.2.

| Напруги  | Варіанти |     |     |     |     |     |
|----------|----------|-----|-----|-----|-----|-----|
|          | 1        | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   |
| $U_{AB}$ | 220      | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 |
| $U_{ab}$ | 130      | 130 | 130 | 225 | 225 | 75  |
| $U_{Bb}$ | 90       | 345 | 300 | 115 | 315 | 155 |
| $U_{Cc}$ | 90       | 345 | 300 | 115 | 315 | 155 |
| $U_{Bc}$ | 190      | 300 | 345 | 315 | 115 | 155 |
| $U_{Cb}$ | 190      | 300 | 190 | 115 | 430 | 230 |

4.3. За даними таблиці 4.3, визначити в абсолютних і відносних величинах зрівнювальний струм між двома помилково включеними на паралельну роботу трансформаторами, якщо виконані всі умови включення на паралельну роботу, крім належності до однієї групи з'єднання.

Таблиця 4.3.

| Величини         | Варіанти           |                    |                    |        |       |        |
|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------|-------|--------|
|                  | 1                  | 2                  | 3                  | 4      | 5     | 6      |
| $S$ , кВА        | 40                 | 63                 | 100                | 400    | 1000  | 2500   |
| $U_1$ , кВ       | 10                 | 6                  | 10                 | 35     | 35    | 20     |
| $U_k$ , %        | 4,5                | 4,5                | 4,5                | 6,5    | 6,5   | 6,5    |
| Група з'єднання: |                    |                    |                    |        |       |        |
| I трансформатор  | У/У <sub>Н-0</sub> | У/У <sub>Н-0</sub> | У/У <sub>Н-6</sub> | У/Д-5  | У/Д-5 | У/Д-11 |
| II трансформатор | У/У <sub>Н-6</sub> | У/У <sub>Н-2</sub> | У/У <sub>Н-8</sub> | У/Д-11 | У/Д-7 | У/У-6  |

4.4. Два трансформатора, що мають однакові  $S = 400$  кВА,  $U_1 = 35$  кВ,  $U_k = 6,5\%$  і  $r_k = 1,5\%$  і групи з'єднання: Д/У - II, працюють паралельно. До них помилково підключений третій трансформатор, який має  $S = 630$  кВА і такі ж інші величини, але група з'єднання У/У - 0. Визначити зрівнювальні струми, що протікають по кожному трансформатору.

4.5. Два трансформатора, дані яких наведені у таблиці 4.4, включені в мережу  $U_1 = U_{1N} = 35$  кВ і працюють паралельно. Визначити величину зрівнювального струму, якщо вторинні напруги відрізняються на  $\Delta U = 5\%$ .



Таблиця 4.4.

| Величини        | Варіанти |               |               |         |               |               |
|-----------------|----------|---------------|---------------|---------|---------------|---------------|
|                 | 1        | 2             | 3             | 4       | 5             | 6             |
| $S, \text{кВА}$ | 100      | 400           | 1000          | 63      | 1000          | 2500          |
|                 | 160      | 630           | 630           | 40      | 2500          | 1600          |
| $P, \text{кВт}$ | 1,97     | 5,9           | 11,6          | 1,28    | 11,6          | 23            |
|                 | 3,1      | 7,6           | 7,6           | 0,88    | 0,88          | 18            |
| $U_k, \%$       | 4,5      | 5,5           | 5,5           | 4,5     | 6,5           | 6,5           |
|                 | 4,5      | 5,5           | 5,5           | 4,5     | 6,5           | 6,5           |
| Група з'єднання | $Y/Y-0$  | $\Delta/Y-11$ | $Y/\Delta-11$ | $Y/Y-0$ | $Y/\Delta-11$ | $Y/\Delta-11$ |
|                 | $Y/Y-0$  | $\Delta/Y-11$ | $Y/\Delta-11$ | $Y/Y-0$ | $Y/\Delta-11$ | $Y/\Delta-11$ |

4.6. Визначити напругу на шинах низької напруги при холостому ході трансформаторів, включених паралельно. Побудувати векторну діаграму. Дані трансформаторів наведені в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5.

| Величини         | Варіанти  |         |               |               |               |               |
|------------------|-----------|---------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|                  | 1         | 2       | 3             | 4             | 5             | 6             |
| $S, \text{кВА}$  | 40        | 100     | 400           | 1000          | 2500          | 4000          |
|                  | 63        | 160     | 630           | 1600          | 4000          | 6300          |
| $U_2, \text{кВ}$ | 240       | 230     | 380           | 380           | 230           | 3150          |
|                  | 220       | 220     | 400           | 390           | 220           | 3000          |
| $U_k, \%$        | 4,5       | 5       | 5,5           | 5,5           | 6,5           | 10,5          |
|                  | 4,5       | 5       | 5,5           | 5,5           | 6,5           | 10,5          |
| $U_{ka}, \%$     | 2         | 1,2     | 1,5           | 1,4           | 1,25          | 1,5           |
|                  | 1,5       | 1       | 1             | 1,1           | 1,0           | 1             |
| Група з'єднання: | $Y/Y_n-0$ | $Y/Y-0$ | $Y/\Delta-11$ | $Y/\Delta-11$ | $Y/\Delta-11$ | $\Delta/Y-11$ |
|                  | $Y/Y_n-0$ | $Y/Y-0$ | $Y/\Delta-11$ | $Y/\Delta-11$ | $Y/\Delta-11$ | $\Delta/Y-11$ |

4.7. Визначити струми, споживані паралельно включеними трансформаторами при живленні від мережі  $U_1 = 35 \text{ кВ}$ . Дані трансформаторів приведені в таблиці 4.6. Група з'єднань  $Y/Y-0$ .

4.8. Визначити допустиме завантаження паралельно працюючих трансформаторів згідно з даними попередньої задачі 4.6 з умови, що жоден трансформатор не завантажений вище номінальної потужності.

Таблиця 4.6.

| Величини             | Варіанти |      |      |      |      |      |
|----------------------|----------|------|------|------|------|------|
|                      | 1        | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
| $S_I, \text{кВА}$    | 630      | 1000 | 63   | 2500 | 2500 | 6300 |
| $S_{II}, \text{кВА}$ | 1000     | 1000 | 1600 | 4000 | 4000 | 2500 |
| $U_{kl}, \%$         | 5,5      | 5    | 5,5  | 6,5  | 6,5  | 7,5  |
| $U_{kII}, \%$        | 5,5      | 5,5  | 5,5  | 6,5  | 7    | 7    |
| $\sum I, \text{А}$   | 250      | 300  | 250  | 1000 | 1000 | 1200 |

4.9. Визначити завантаження кожного з паралельно включених трансформаторів згідно даних таблиці 4.7.

Таблиця 4.7.

| Величини              | Варіанти |      |      |       |      |      |
|-----------------------|----------|------|------|-------|------|------|
|                       | 1        | 2    | 3    | 4     | 5    | 6    |
| $S_I, \text{кВА}$     | 100      | 1000 | 690  | 16000 | 1000 | 4000 |
| $U_{kl}, \%$          | 4,5      | 5,5  | 5,5  | 8     | 5,5  | 6,5  |
| $S_{II}, \text{кВА}$  | 100      | 2500 | 630  | 6300  | 2500 | 2500 |
| $U_{kII}, \%$         | 5        | 6,5  | 5    | 7,5   | 5,5  | 6,5  |
| $S_{III}, \text{кВА}$ | 100      | 2500 | 630  | 10000 | 630  | 1000 |
| $U_{kIII}, \%$        | 5,5      | 6    | 6    | 7,5   | 5,5  | 5,5  |
| $\sum S, \text{кВА}$  | 300      | 5000 | 1800 | 30000 | 4000 | 7500 |

#### Контрольні питання

1. Що називають групою з'єднання? Вкажіть, які чинники обумовлюють групу з'єднання.
2. Як експериментально визначити групу з'єднання трансформатора?
3. Що означає група з'єднання  $Y/Y-0$ ?
4. Що означає група з'єднання  $D/Y-11$ ?
5. До чого призводить порушення умови про рівність груп з'єднання при паралельному включенні трансформаторів?
6. Чому трансформатори, що включаються на паралельну роботу, повинні мати однакові коефіцієнти трансформації?
7. Які умови включення на паралельну роботу можна перевірити, якщо трансформатори включити паралельно без навантаження?
8. Чим визначається величина зрівнювального струму паралельно працюючих трансформаторів?

9. Чому в трансформаторах рівної потужності струм навантаження розподіляється обернено пропорційно величинам напруги короткого замикання?
10. Чому при виконанні всіх умов включення трансформаторів на паралельну роботу струм навантаження розподіляється пропорційно їх номінальним потужностям?
11. Які допустимі відхилення для кожної з умов включення трансформаторів на паралельну роботу?

## 5 Несиметричні режими роботи трансформаторів

При вирішенні завдань даного розділу коефіцієнт трансформації прийняти рівним одиниці, а струмом намагнічування знехтувати.

5.1. У трифазному трансформаторі, номінальна первинна фазна напруга якого  $U_1 = 1000 \text{ В}$ , опір короткого замикання  $Z_k = j 0,1 \text{ Ом}$ , схема з'єднання обмоток  $Y/Y$ . Між двома фазами вторинної обмотки виникло коротке замикання. Визначити струми в первинній і вторинній обмотках и побудувати векторну діаграму.

5.2. У трансформаторі за умовою попередньої задачі, прийнявши схему з'єднання обмоток  $Y/Y_n$  і опір нульової послідовності  $Z_0 = j 1,0 \text{ Ом}$ , коротке замикання сталося між однією з фаз і нульовою точкою вторинної обмотки. Визначити струми в первинній і вторинній обмотках і побудувати векторну діаграму.

5.3. Вирішити попередню задачу, прийнявши схему з'єднання обмоток  $\Delta/Y_n$ .

5.4. Трифазний трансформатор має наступні дані:  $U_1 = 1000 \text{ В}$  - фазна напруга;  $Z_k = j0,1 \text{ Ом}$  – опір короткого замикання; схема з'єднання обмоток  $Y/Y$ . Визначити струми і напруги в первинній та вторинній обмотках для випадку, коли стався обрив фази, з вторинного боку. Опори навантаження  $Z_H$  фаз  $b$  і  $c$  наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1.

| № вар. | 1   | 2   | 3          | 4          | 5          | 6      | 7      | 8      |
|--------|-----|-----|------------|------------|------------|--------|--------|--------|
| $Z_H$  | 0,4 | 0,6 | $0,4+j0,3$ | $0,2+j0,3$ | $0,4+j0,6$ | $j0,3$ | $j0,6$ | $j1,0$ |

5.5. Прийнявши умови попередньої задачі, визначити струми і напруги в первинній та вторинній обмотках при несиметричному активному навантаженні. Опір навантажень фаз:  $Z_a = 1 \text{ Ом}$ ;  $Z_b = 0,7 \text{ Ом}$ ;  $Z_c = j0,4 \text{ Ом}$ .

5.6. Трифазний трансформатор має наступні дані:  $U_1 = 1000 \text{ В}$  - фазна напруга;  $Z_k = j0,1 \text{ Ом}$ ;  $Z_0 = j0,4 \text{ Ом}$ ; схема з'єднання обмоток  $Y/Y_n$ . Визначити вторинні струми і напруги при однофазному навантаженні. Опір навантаження  $Z_H$  фази  $a$  наведено в таблиці 5.1.

5.7. Приймавши умови попередньої задачі, визначити струми і напруги в первинній та вторинній обмотках при несиметричному активному навантаженні. Опір навантажень фаз:  $Z_a = 1 \text{ Ом}$ ;  $Z_b = 0,7 \text{ Ом}$ ;  $Z_c = j0,4 \text{ Ом}$ .

5.8. Трифазний понижуючий трансформатор з'єднаний за схемою  $U/\Delta$ . Первинні лінійні напруги дорівнюють:  $U_{AB} = 200 \text{ В}$ ;  $U_{BC} = 250 \text{ В}$ ;  $U_{CA} = 200 \text{ В}$ . Трансформатор навантажений активним струмом  $10 \text{ А}$  між затискачами  $a$  і  $c$ . Опір короткого замикання  $Z_k = 0,2 + j0,9 \text{ Ом}$ . Визначити вторинні струми і напруги трансформатора.

### Контрольні питання

1. Чому дорівнює опір трансформатора для струмів прямої і зворотної послідовностей?
2. Від чого залежить опір трансформатора струмам нульової послідовності?
3. Чому дорівнює опір трансформатора струмам нульової послідовності при з'єднанні обмоток по схемі  $Y/Y_n$ ?
4. Чому дорівнює опір трансформатора струмам нульової послідовності при з'єднанні обмоток по схемі  $Y_n/\Delta$ ?
5. Чи порушується симетрія *е.р.с.* і напруг, коли вторинна обмотка з'єднана зіркою, при включенні однофазного споживача між двома лінійними проводами?
6. Які несприятливі наслідки при включенні однофазного споживача між нульовим і лінійним проводами, якщо обмотки трансформатора з'єднані по схемі  $\Delta/Y_n$ ?
7. Які ускладнення виникають при включенні однофазного споживача між нульовим і лінійним проводами, якщо схема з'єднання обмоток трансформатора  $Y/Y_n$ ?
8. У якому випадку буде більше порушення симетрії фазних *е.р.с.* і напруг, якщо схема з'єднання обмоток трансформатора  $Y/Y_n$  і однофазний споживач включений між нульовим і лінійним проводами: а) при стержневій конструкції магнітопроводу; б) при броньовій конструкції магнітопроводу?
9. Яким чином можна експериментально визначити опір нульової послідовності при з'єднанні обмоток по схемі: а)  $Y/Y_n$ ; б)  $\Delta/Y_n$ ?

## 6 Перехідні режими роботи трансформаторів

6.1. Визначити в абсолютних і відносних одиницях струми трифазного короткого замикання трансформатора, використовуючи дані таблиці 6.1. Напруга мережі первинної обмотки дорівнює 35 кВ.

Таблиця 6.1.

| Величини        | Варіанти |      |     |      |      |      |
|-----------------|----------|------|-----|------|------|------|
|                 | 1        | 2    | 3   | 4    | 5    | 6    |
| $S, \text{кВА}$ | 63       | 100  | 400 | 1000 | 2500 | 6300 |
| $U_k, \%$       | 4,5      | 4,5  | 5   | 5,5  | 6,5  | 7,5  |
| $k_{y0}$        | 1,43     | 1,62 | 1,7 | 1,73 | 1,75 | 1,8  |

6.2. За даними, наведеними у таблиці 6.2, визначити ударний коефіцієнт і ударний струм 3-х фазного короткого замикання у відносних одиницях і в абсолютних одиницях.

Таблиця 6.2.

| Величини        | Варіанти |      |      |      |      |      |
|-----------------|----------|------|------|------|------|------|
|                 | 1        | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
| $S, \text{кВА}$ | 2,5      | 40   | 400  | 1600 | 4000 | 6300 |
| $U_1, \%$       | 3        | 10   | 35   | 20   | 20   | 35   |
| $U_k, \%$       | 4,5      | 4,5  | 5    | 5,5  | 6,5  | 7,5  |
| $\cos\phi_k$    | 0,1      | 0,11 | 0,14 | 0,15 | 0,16 | 0,17 |

6.3. Для трансформатора ТМ 1000/6 в досліді короткого замикання визначено  $U_k = 330 \text{ В}$  і втрати  $P_k = 11,6 \text{ кВт}$ . Визначити ударний струм раптового 3-х фазного короткого замикання, якщо обмотки з'єднані за схемою У/У.

6.4. Трансформатор ТМ 4000/35 має втрати при холостому ході  $P_o = 5,3 \text{ кВт}$ , напруга короткого замикання  $U_k = 7,5\%$  і максимальний ККД при коефіцієнті навантаження  $K_H = 0,45$ . Визначити величину ударного струму при раптовому трифазному короткому замиканні. Схема з'єднання обмоток - У/Д.

6.5. Користуючись даними таблиці 6.3, визначити у скільки разів зростають електродинамічні зусилля в трансформаторі при ударному струмі раптового трифазного короткого замикання в порівнянні з номінальним режимом.

Таблиця 6.3.

| Величини        | Варіанти |     |      |      |      |       |
|-----------------|----------|-----|------|------|------|-------|
|                 | 1        | 2   | 3    | 4    | 5    | 6     |
| $S, \text{кВА}$ | 25       | 400 | 1000 | 2500 | 6300 | 16000 |
| $x_k, \%$       | 4        | 4,7 | 5,3  | 6,45 | 7,45 | 7,95  |
| $r_k, \%$       | 2        | 1,2 | 1,2  | 1    | 0,8  | 0,6   |

6.6. Визначити амплітуду найбільшого значення струму включення трансформаторів на холостий хід, якщо крива їх намагнічування наведена в таблиці 6.4 та основні дані в таблиці 6.5. Для всіх варіантів прийняти відношення амплітуд потоку включення до усталеного потоку холостого струму рівним 2,2.

Таблиця 6.4.

|                |     |     |     |     |     |      |     |
|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|
| $H, \text{А}$  | 2,5 | 5   | 10  | 100 | 200 | 300  | 400 |
| $B, \text{Тл}$ | 0,8 | 1,4 | 1,6 | 2,0 | 2,4 | 2,75 | 3,2 |

Таблиця 6.5.

| Величини                | Варіанти |               |               |               |               |               |
|-------------------------|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|                         | 1        | 2             | 3             | 4             | 5             | 6             |
| $S, \text{кВА}$         | 630      | 1600          | 2500          | 4000          | 6300          | 1600          |
| $U_1, \text{кВ}$        | 3        | 6             | 10            | 10            | 10            | 35            |
| Група з'єднання обмоток | $Y/Y-0$  | $Y/\Delta-11$ | $Y/\Delta-11$ | $Y/\Delta-11$ | $\Delta/Y-11$ | $Y/\Delta-11$ |
| $I_o, \%$               | 2,4      | 1,8           | 2,0           | 1,25          | 1,4           | 1,1           |

### Контрольні питання

1. Чим визначається величина усталеного струму короткого замикання?
2. Що розуміють під величиною ударного струму раптового короткого замикання?
3. Які фактори впливають на величину ударного струму?
4. Чому величина ударного коефіцієнта раптового короткого замикання знижується зі зменшенням потужності трансформатора?
5. У чому полягає діалектична суперечність при виборі величини напруги короткого замикання трансформатора?
6. Якими чинниками визначається величина усталеного струму холостого ходу трансформатора?

7. Який найбільш несприятливий момент включення трансформатора в мережу при відсутності навантаження?
8. Якими складовими визначається найбільший сплеск потоку трансформатора при включенні його в мережу без навантаження?
9. Як впливає насичення магнітопровода трансформатора на максимальний сплеск струму при включенні в мережу на холостому ході? Яка кратність цього струму?
10. Як обмежити струми трансформатора при включенні його в мережу без навантаження?

## 7 Спеціальні типи трансформаторів

7.1. Для однофазних автотрансформаторів, дані яких наведені в табл. 7.1, знайти відсутні величини, нехтуючи струмом холостого ходу.

Таблиця 7.1.

| Величини           | Варіанти |     |     |      |      |     |
|--------------------|----------|-----|-----|------|------|-----|
|                    | 1        | 2   | 3   | 4    | 5    | 6   |
| $U_1$ , В          | 220      | 380 | 220 | -    | -    | 110 |
| $k_{mp}$           | 2        | -   | -   | -    | -    | 2   |
| $U_2$ , В          | -        | 220 | -   | 110  | 220  | -   |
| $W_1$              | -        | 600 | -   | 1000 | 1500 | -   |
| $W_2$              | 100      | -   | 300 | -    | -    | 400 |
| $I_1$ , А          | -        | -   | -   | 4    | 3    | -   |
| $I_2$ , А          | -        | -   | -   | 3    | 3    | -   |
| $S_2$ , кВА        | 50       | -   | 1   | -    | -    | -   |
| $S_{EM}$ , кВА     | -        | 5   | 0,6 | -    | -    | 0,2 |
| $S_{\Sigma}$ , кВА | -        | -   | -   | -    | -    | -   |

7.2. Визначити число витків і струми первинної та загальної частини обмоток автотрансформаторів: зменшення маси і втрат в обмотках в порівнянні з трансформаторами. Індукція в магнітопроводі  $B = 1,4$  Тл. Також задано площу поперечного перерізу сталі магнітопровода,  $S_{cm}$ . Варіанти завдань наведені в табл. 7.2.

Таблиця 7.2.

| Величини              | Варіанти |     |     |       |       |     |
|-----------------------|----------|-----|-----|-------|-------|-----|
|                       | 1        | 2   | 3   | 4     | 5     | 6   |
| $S_{cm}, \text{см}^2$ | 100      | 25  | 50  | 200   | 300   | 5   |
| $U_1, \text{В}$       | 3000     | 220 | 350 | 10000 | 35000 | 220 |
| $U_2, \text{В}$       | 2000     | 110 | 250 | 6300  | 22000 | 110 |
| $S_2, \text{кВА}$     | 560      | 180 | 50  | 5600  | 10000 | 0,1 |

7.3. Для трансформаторів випрямних установок, що використовуються в різних схемах випрямлення, при заданих електромагнітних навантаженнях  $B = 1,4 \text{ Тл}$ ,  $J = 3 \text{ А/мм}^2$ , знайти число витків і площу поперечного перерізу проводу обмоток. Варіанти завдань наведені в табл. 7.3.

Таблиця 7.3.

| Величини                                    | Варіанти            |           |                   |                   |                           |                     |
|---|---------------------|-----------|-------------------|-------------------|---------------------------|---------------------|
|   | 1                   | 2         | 3                 | 4                 | 5                         | 6                   |
| потужність навантаження<br>$P_d, \text{Вт}$ | 1000                | 200       | 500               | 100               | 2000                      | 500                 |
| Випрямлена напруга,<br>$U_d, \text{В}$      | 60                  | 100       | 200               | 12                | 500                       | 600                 |
| Схема випрямлення                           | $Y/Y_n$<br>трифазна | однофазна | однофазна мостова | однофазна мостова | трифазна мостова<br>$Y/Y$ | трифазна<br>$Y/Y_n$ |
| Первинна напруга,<br>$U_1, \text{В}$        | 220                 | 380       | 2380              | 220               | 380                       | 220                 |
| переріз сталі,<br>$S_{cm}, \text{см}^2$     | 30                  | 20        | 15                | 10                | 50                        | 25                  |

7.4. Визначити амплітуду і вузлову помилку вимірювальних трансформаторів струму при вторинному номінальному струмі  $5 \text{ А}$ , опір вторинної обмотки  $Z_2 = (0,5 + j 2) \cdot 10^3$ , і опір навантаження  $Z_H = (0,01 + j 0,01) \text{ Ом}$ . Варіанти завдань наведені в табл. 7.4.



Таблиця 7.4.

| Величини          | Варіанти    |              |              |              |              |              |
|-------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                   | 1           | 2            | 3            | 4            | 5            | 6            |
| $I, A$            | 50          | 150          | 1000         | 500          | 2000         | 2000         |
| $Z_{\mu}, \Omega$ | $2 + j 100$ | $0,3 + j 20$ | $0,01 + j 2$ | $0,05 + j 5$ | $0,1 + j 20$ | $0,01 + j 1$ |

7.5. Визначити амплітуду і кутову помилку вимірювальних трансформаторів напруги при вторинному номінальній напрузі  $U_2 = 110 B$ , опір навантаження  $Z_H = (2000 + j 1000) \Omega$ , опір короткого замикання, наведене до вторинної обмотки  $Z_H = (50 + j 150) \Omega$ , струм холостого ходу, наведений до вторинної обмотки  $I_0 = 1 \cdot 10^{-4} A$ . Варіанти завдань наведені в табл. 7.5.

Таблиця 7.5.

| Величина | 1   | 2     | 3     | 4    | 5    | 6     | 7   | 8    |
|----------|-----|-------|-------|------|------|-------|-----|------|
| $U_1, B$ | 380 | 35000 | 20000 | 6000 | 3000 | 10000 | 600 | 1000 |

7.6. Для трьохобмоткових трансформаторів з напругою  $U_1/U_2/U_3 = 110/220/35 kV$  при схемі з'єднання Ун/У/Д і напругах короткого замикання  $U_{K12} = (2 + j 6,5)\%$ ,  $U_{K13} = (2 + j 9,5)\%$ ,  $U_{K23} = (2 + j 12)\%$  визначити напруги на затискачах вторинних обмоток. Варіанти завдань наведені в табл. 7.6.

Таблиця 7.6.

| Величини         | Варіанти |     |     |     |     |     |
|------------------|----------|-----|-----|-----|-----|-----|
|                  | 1        | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   |
| $I_2, \%$        | 80       | 50  | 30  | 80  | 30  | 50  |
| $I_3, \%$        | 20       | 50  | 60  | 20  | 60  | 50  |
| $\cos \varphi_2$ | 0,9      | 0,9 | 0,8 | 0,8 | 0,7 | 0,7 |
| $\cos \varphi_3$ | 0,8      | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 |

### Контрольні питання

1. Які трансформатори називаються автотрансформаторами?
2. Як визначається прохідна і розрахункова потужність автотрансформатора?
3. Яка частина потужності передається в автотрансформаторах електричним і магнітними шляхами?
4. Які вигоди дає застосування автотрансформаторів?
5. Що розуміється під типовою потужністю випрямного трансформатора?

6. Як впливає вибір схеми випрямлення на типову потужність випрямного трансформатора?
7. Де використовуються вимірювальні трансформатори?
8. Чим визначається клас точності вимірювальних трансформаторів?
9. Від чого залежить похибка вимірювальних трансформаторів струму?
10. Від чого залежить похибка вимірювальних трансформаторів напруги?
11. Які заходи застосовують для підвищення точності вимірювальних трансформаторів?
12. До чого може призвести розрив у вторинному ланцюзі трансформатора струму?
13. Де використовують трьохобмоткові трансформатори?
14. Як визначити параметри схеми заміщення трьохобмоткового трансформатора за дослідними даними?

### Відповіді до завдань:

1.1.  $k=50$ ,  $I_{1\phi}=3,15$  А,  $I_{2\phi}=157,5$  А; 1.2.  $B_{ст}=1,488$  Тл; 1.3.  $\Delta p_m = 179$  Вт; 1.4.  $S_m = 18$  см<sup>2</sup>; 1.7. а)  $P_{o+10\%} = 1,78 \cdot P_o$ ;  $I_{o+10\%} = 1,62 \cdot I_o$ ; б)  $P_{o-10\%} = 0,68 \cdot P_o$ ;  $I_{o-10\%} = 0,756 \cdot I_o$ ; 1.8.  $I_{o+5\%} = 1,26 \cdot I_o$ ;  $I_{o-5\%} = 0,87 \cdot I_o$ ; 1.9. а)  $I_{o40 \Gamma_{ц}} = 0,66 \cdot I_o$ ; б)  $I_{o60 \Gamma_{ц}} = 4,62 \cdot I_o$ ; 2.1.  $I_{0a\%}=0,27\%$ ,  $I_{0p\%}=99,73\%$ ; 2.2.  $U_{ка\%}=1,97\%$ ,  $U_{кр\%}=98,03\%$ ; 2.3.  $r_k=0,88$  Ом,  $x_k=44,89$  Ом,  $z_k=44,9$  Ом,  $\cos\varphi_k=0,0197$ ; 2.4.  $I_{0a\%} = 0,067 \%$ ;  $I_{0p\%} = 2,599 \%$ ;  $I_{0p\%} = 2,599 \%$ ;  $\cos\varphi_o = 0,14$ ; 2.5.  $U'_2 = 5,77$  В;  $I'_2 = 5,77$  А; 2.6.  $U'_2 = 5,77$  В;  $I'_2 = 5,77$  А;  $w_1 = 2137$ ;  $w_2 = 48$ ; 2.7.  $\cos\varphi_o = 0,084$ ;  $Z_o = 115,4 \cdot 10^3$  Ом;  $r_o = 9,6 \cdot 10^3$  Ом;  $x_o = 115,0 \cdot 10^3$  Ом; 2.8.  $r_1 \approx r'_2 = 1,7$  Ом;  $x_1 \approx x'_2 = 9,6$  Ом; 2.9.  $r_m = 8385$  Ом;  $x_m = 56035$  Ом; 2.10.  $r_1 \approx r'_2 = 5,3$  Ом;  $x_1 \approx x'_2 = 35,5$  Ом; 2.11.  $r_1 \approx r'_2 = 5,3$  Ом;  $x_1 \approx x'_2 = 35,5$  Ом;  $r_m = 8385$  Ом;  $x_m = 56035$  Ом; 3.11.  $\eta_H = 0,974$ ;  $\beta' = 0,43$ .

## **Перелік рекомендованої літератури**

1. Вольдек А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.
2. Кацман М.М., Электрические машины. М., Высшая школа, 1990. -464 с.
3. Копылов И.П. Электрические машины / И. П. Копылов. – М.: Логос, 2000. – 607 с.
4. Костенко М.П. Электрические машины, т.1 / М.П. Костенко, Д.М. Пиотровский. – Л.: Энергия, 1972. – 544 с.
5. Куликов А.А. Сборник задач по электрическим машинам / А.А. Куликов, М.И. Немировский. – М.-К.: Машгиз, 1961. – 200 с.
6. Меркин Г.Б. Электрические машины и трансформаторы: пособие по решению задач / Г.Б. Меркин, Н.П. Титов, С.П. Печерица. – Л.: Изд-во Северо-Зап. заоч. политех. ин-та, 1969. – 277 с.
7. Петров Г.Н. Электрические машины, т.1 / Г.Н. Петров. – Л.: Энергия, 1974. – 240 с.
8. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов / П.М. Тихомиров. – М.: Энергия, 1976. – 544 с.

## Додаток

Крива намагнічування листової електротехнічної сталі марки 3413  
 $B[\text{Тл}] = f(H [\times 10^4 \text{ А/м}])$ .

| $B, \text{Тл}$ | $H, \times 10^4 \text{ А/м}$ |       |       |       |       |      |       |       |       |       |
|----------------|------------------------------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
|                | 0                            | 0,01  | 0,02  | 0,03  | 0,04  | 0,05 | 0,06  | 0,07  | 0,08  | 0,09  |
| <b>1,2</b>     | 2,43                         | 2,46  | 2,49  | 2,52  | 2,55  | 2,58 | 2,61  | 2,64  | 2,67  | 2,71  |
| <b>1,3</b>     | 2,75                         | 2,79  | 2,83  | 2,87  | 2,91  | 2,95 | 3,0   | 3,05  | 3,1   | 3,15  |
| <b>1,4</b>     | 3,2                          | 3,26  | 3,32  | 3,38  | 3,44  | 3,5  | 3,58  | 3,66  | 3,74  | 3,82  |
| <b>1,5</b>     | 3,9                          | 4,02  | 4,14  | 4,26  | 4,38  | 4,5  | 4,64  | 4,78  | 4,92  | 5,06  |
| <b>1,6</b>     | 5,2                          | 5,44  | 5,66  | 5,88  | 6,1   | 6,32 | 6,65  | 6,98  | 7,32  | 7,66  |
| <b>1,7</b>     | 8,0                          | 8,4   | 8,9   | 9,4   | 9,9   | 10,4 | 11,32 | 12,24 | 13,16 | 14,08 |
| <b>1,8</b>     | 15,0                         | 15,92 | 16,84 | 17,76 | 18,68 | 19,6 | 20,52 | 21,44 | 22,36 | 23,28 |

При вирішенні задачі про несиметричні режими роботи трансформаторів можуть бути корисними деякі співвідношення, наведені нижче.

При відсутності струмів нульової послідовності і сполученні вторинної обмотки в трикутник:

$$/1/ \quad \begin{cases} i_{a\phi} = \frac{1}{3}(i_a - i_c) \\ i_{b\phi} = \frac{1}{3}(i_b - i_a) \\ i_{c\phi} = \frac{1}{3}(i_c - i_b) \end{cases}$$

Фазні первинні та вторинні напруги при наявності магнітної рівноваги струмів в кожній фазі пов'язані рівностями:

$$/2/ \quad \begin{cases} \dot{U}_A - i_{A\phi} Z_K = - \dot{U}_a \\ \dot{U}_B - i_{B\phi} Z_K = - \dot{U}_b \\ \dot{U}_C - i_{C\phi} Z_K = - \dot{U}_c \end{cases}$$

При наявності струмів нульової послідовності, якщо трансформатор з'єднаний за схемою  $Y/Y_n$ :

$$/3/ \quad \begin{cases} \dot{U}_A = \frac{1}{3}(\dot{U}_{AB} - \dot{U}_{CA}) + \dot{I}_0 Z_{оп} \\ \dot{U}_B = \frac{1}{3}(\dot{U}_{BC} - \dot{U}_{AB}) + \dot{I}_0 Z_{оп} \\ \dot{U}_C = \frac{1}{3}(\dot{U}_{CA} - \dot{U}_{BC}) + \dot{I}_0 Z_{оп} \end{cases}$$

Співвідношення в випрямних трансформаторах:

| Величина                                    | Схема випрямлення    |                      |                      |                       |
|---|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
|   | однофазна            | однофазна<br>мостова | трифазна             | трифазна<br>мостова   |
| Напруга<br>вторинної<br>обмотки             | $2,22 U_d$           | $1,11 U_d$           | $0,855 U_d$          | $0,43 U_d$            |
| Ефективний<br>струм<br>вторинної<br>обмотки | $1,57 I_d$           | $1,11 I_d$           | $0,58 I_d$           | $0,815 I_d$           |
| Ефективний<br>струм<br>первинної<br>обмотки | $1,51 \frac{I_d}{K}$ | $1,11 \frac{I_d}{K}$ | $0,48 \frac{I_d}{K}$ | $0,815 \frac{I_d}{K}$ |
| Типова<br>потужність                        | $3,5 P_d$            | $1,23 P_d$           | $1,35 P_d$           | $1,045 P_d$           |

Зв'язок між первинним і вторинним струмом:

$$I'_2 = -\frac{Z_\mu}{Z_\mu + Z'_2 + Z_M} I_1$$

Зміна напруги для триобмоткового трансформатора:

$$\begin{aligned} \Delta U_{12} &= K_{\text{НГ}_2} U_{a12} \cos \varphi_2 + K_{\text{НГ}_2} U_{p12} \sin \varphi_2 + K_{\text{НГ}_3} U_{a13} \cos \varphi_3 + K_{\text{НГ}_3} U_{p13} \sin \varphi_3 + \\ &0,5 (K_{\text{НГ}} U_{a12} \sin \varphi_2 - K_{\text{НГ}_2} U_{p12} \cos \varphi_2 + K_{\text{НГ}_3} U_{a13} \sin \varphi_3 - K_{\text{НГ}_3} U_{p13} \cos \varphi_3)^2; \\ \Delta U_{13} &= K_{\text{НГ}_3} U_{a13} \cos \varphi_3 + K_{\text{НГ}_3} U_{p13} \sin \varphi_3 + K_{\text{НГ}_2} U_{a12} \cos \varphi_2 + K_{\text{НГ}_2} U_{p12} \sin \varphi_2 + \\ &0,5 (K_{\text{НГ}_3} U_{a13} \sin \varphi_3 - K_{\text{НГ}_3} U_{p13} \cos \varphi_3 + K_{\text{НГ}_2} U_{a12} \sin \varphi_2 - K_{\text{НГ}_2} U_{p12} \cos \varphi_2); \end{aligned}$$